

学校编码: 10384
学 号: 200424021

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

SiGe 波导共振腔增强型光电探测器

SiGe waveguide resonant-cavity-enhanced
photodetector

陈荔群

指导教师姓名: 李 成 副 教 授

专 业 名 称: 凝 聚 态 物 理

论文提交日期: 2007 年 月

论文答辩时间: 2007 年 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2007 年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

传统的SiGe-PIN光电探测器在向高响应速度和高量子效率发展的过程中提出了垂直谐振腔增强型和波导型结构的光电探测器,前者利用谐振腔的增强作用成功地实现了量子效率和响应速度的解耦,但其光谱响应线宽和量子效率之间仍然存在折衷关系,且吸收区的厚度受到SiGe临界厚度的限制;后者入射光传播方向和电流方向相互垂直,解除了响应速度和内量子效率的制约关系,并且能够方便地进行光电集成。

我们提出了一种新型高量子效率的SiGe/Si多量子阱波导共振腔增强型光电探测器,工作波长从可见到近红外波段。新型探测器结合了波导探测器与共振腔增强型探测器的优点,与传统波导探测器相比,器件尺寸大为减小,在相同的量子效率下可以得到更高的响应速度。与垂直共振腔结构探测器相比,吸收区的长度不受SiGe临界厚度的限制,可以灵活设计,从而达到优化器件的目的。本论文主要开展了以下几个方面的工作:

(1) 以共振腔增强型(RCE)探测器的理论为基础,详细分析了制约 RCE 探测器量子效率、波长选择性、响应速度的主要参数如前后反射镜的反射率、吸收长度等。利用传输矩阵方法理论模拟了 SiGe/Si 多量子阱波导共振腔增强型探测器的性能,优化了器件结构的各个参数,设计出内量子效率大约为 82%,响应谱的半高宽大约为 1nm 的器件。

(2) 以介质波导的电磁波理论为基础,利用光束传播方法(BPM)模拟了 SiGe/Si 多量子阱脊形波导的三维光场分布,分析了光纤和波导直接对准的耦合效率。

(3) 详细研究了 SiGe 探测器的制作流程和关键工艺技术,在现有的条件下摸索了小尺寸线条的光刻条件,以及 ICP 干法刻蚀各种参数对器件线条、侧壁粗糙度的影响,成功制备出波导共振增强型探测器和波导探测器。

(4) 测试并分析了器件的电学特性和光谱响应。结果表明:两种结构的探测器都具有较小的暗电流。在一定范围内,对于不同吸收长度的波导探测器,光电流强度随着吸收长度增加而增大,峰值响应波长为 1008 nm。分析了波导共振增强型探测器未得到共振效应的原因,为进行下一步工作打下基础。

关键词: RCE, SiGe/Si 多量子阱材料, 波导探测器。

Abstract

Resonant-cavity-enhanced (RCE) photodetectors and waveguide photodetectors have been proposed for achieving high speed and quantum efficiency. The former leads to the decoupling of quantum efficiency and speed successfully, but there is trade-off between the responsivity and the line width of spectra, and the absorption length is limited by the critical thickness of SiGe. The latter resolves the interdependence between response speed and quantum efficiency as the directions of incident light and current are orthogonal and also can be easily applied to optoelectronic integration.

We propose a novel SiGe waveguide-RCE photodetector for visible to near infrared operation. The novel device owns the merits of waveguide and waveguide-RCE photodetector. Contrasting to the conventional waveguide photodetectors, the device area can be designed small enough to satisfy high - speed operation. Contrasting to the RCE photodetectors, the limitation of SiGe critical thickness is circumvented and clever design can be expected. The following studies were carried out in the present thesis:

(1) The influence of parameters on the performance including quantum efficiency, wavelength selectivity and response speed of waveguide-RCE photodetectors is studied in details. The parameters such as reflectivity of the front and rear mirrors, absorption length are optimized to obtain high quantum efficiency. The simulation by the method of transmission matrix predicts that high quantum efficiency up to 82% can be obtained for the photodetectors with 1nm line width. An optimization procedure for designing RCE photodetectors is proposed. Simultaneously, the main factors for determining the response speed are analyzed.

(2) Based on electromagnetic theory of dielectric waveguide, 3D distribution of the field is simulated by BPM of SiGe/Si MQW waveguide. The coupling efficiency between fiber and waveguide is analyzed.

(3) The processes and the key technologies for fabricating SiGe photodetectors

were studied. The condition related to photolithography and various parameters of ICP are grouped to form small waveguide and lateral reflectors with smooth side-wall. Waveguide photodetector and waveguide-RCE photodetector have been successfully fabricated.

(4) Electrical performance and spectral response of the device are measured. Relatively small dark current has been obtained for both types of the photodetectors. Within a certain range, the intensity of photocurrent increases with increasing absorption length of waveguide photodetectors, and the spectral response peak wavelength is about 1008 nm.

Keywords: RCE, SiGe/Si MQW, Waveguide photodetector

目 录

第一章 绪论	1
1.1 SiGe 材料的研究进展	1
1.1.1 SiGe/Si 多量子阱材料	1
1.1.2 Ge 纳米岛材料和高组分表面起伏的多量子阱	3
1.1.3 外延 Ge 材料	4
1.2 SiGe/Si 多量子阱材料的性质	4
1.3 器件结构的选择	7
1.3.1 PIN 光电二极管	7
1.3.2 波导探测器	8
1.3.3 RCE 探测器	9
1.3.4 HPT 探测器	10
1.4 本论文的创新点和主要工作	10
参考文献	11
第二章 波导共振腔增强型探测器的基本理论和结构设计	14
2.1 RCE 探测器自洽解析理论	14
2.1.1 RCE 探测器的量子效率特性分析	15
2.1.2 RCE 探测器的波长选择作用	18
2.1.3 RCE 探测器的驻波效应	20
2.2 RCE 探测器的高频特性	20
2.3 介质平面波导理论	23
2.3.1 麦克斯韦方程和边界条件	23
2.3.2 二维平板波导	24
2.3.3 SiGe 多量子阱平板波导	26
2.3.4 三维波导	29
2.4 RCE 探测器传输矩阵模拟方法	31
2.5 SiGe/Si 多量子阱波导共振增强型探测器的基本结构和优化	33

2.5.1 器件结构设计	33
2.5.2 布拉格反射镜的设计和综合优化	34
2.5.3 结果与讨论	37
参考文献	37
第三章 版图设计与器件制作	39
3.1 器件的版图设计	39
3.2 器件制作过程	40
参考文献	49
第四章 器件的性能测试和结果讨论	50
4.1 器件的 I-V 特性	50
4.1.1 暗电流测试	50
4.1.2 理想因子的计算	52
4.2 光电响应光谱特性	52
4.2.1 波导探测器的光响应谱分析	54
4.2.2 波导-RCE 探测器的光响应谱分析	55
4.3 本章小结	56
第五章 总结与展望	57
硕士期间发表的论文	58
致 谢	59

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research progress of SiGe Material.....	1
1.1.1 SiGe/Si MQW material.....	1
1.1.2 Ge islands and undulating SiGe/Si MQW.....	3
1.1.3 Ge epitaxial material.....	4
1.2 Properites of strained SiGe/Si MQW.....	4
1.3 Structures of devices.....	7
1.3.1 PIN photo diode.....	7
1.3.2 Waveguide photodectors.....	8
1.3.3 RCE photodectors.....	9
1.3.4 HPT photodectors.....	10
1.4 Main Work and innovation of the thesis.....	10
References.....	11
Chapter 2 Basic concept and structure design of waveguide-RCE	
photodetectors	14
2.1 Theoretical analysis of RCE photodetectors	14
2.1.1 Quantum efficiency.....	15
2.1.2 Wavelength selectivity.....	18
2.1.3 Standing wave effect.....	20
2.2 High speed properties of RCE photodetectors	20
2.3 Theory of flat dielectric waveguide	23
2.3.1 Maxwell equations and boundary conditions.....	23
2.3.2 2D flate waveguide.....	24
2.3.3 SiGe/Si MQW flate waveguide.....	26
2.3.4 3D flate waveguide.....	29
2.4 Scattering transmission matrix of waveguide-RCE photodetectors ..	31

2.5 Optimization of SiGe waveguide-RCE photodetector.....	33
2.5.1 Design of device structure	33
2.5.2 Design of bragg mirrors and optimization	34
2.5.3 Result and discussion.....	37
References	37
Chapter 3 Mask design and device fabrication.....	39
3.1 Mask design	39
3.2 Device Processes	40
References	49
Chapter 4 Measurement and Analysis	50
4.1 I-V characteristics.....	50
4.1.1 Dark current.....	50
4.1.2 Ideal factor.....	52
4.2 Photoresponsivity spectrum.....	52
4.2.1 Photoresponsivity spectrum of waveguide photodetector	54
4.2.2 Photoresponsivity spectrum of waveguide-RCE photodetector ..	55
4.3 Summary.....	56
Chapter 5 Summary and prospects	57
Publication during master degree study	58
Acknowledgement.....	59

第一章 绪论

随着光通信的不断发展,对 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 通信窗口的红外探测器提出了越来越高的要求,制作高速率、高响应度和低漏电流,响应波长在 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 的近红外探测器,并实现光电集成接收机芯片一直是人们所追求的目标。Si是信息领域里最重要的半导体材料之一,是微电子电路的基石,其在微电子领域已获得了巨大的发展,其中SiGe材料和现有成熟的Si工艺完全兼容,通过优化生长条件,可以使其带隙扩展到光通讯波段,引起人们极大兴趣。特别是硅基光波导器件^[1-2], SiGe HBT^[3-4]的性能已经得到很大提高,而在硅基有源光电子器件方面,长波长光电探测器的研究也得到了相当的重视,性能也在不断地提高。

下面我们主要从吸收区材料、器件结构、并分析了 SiGe/Si 多量子阱材料的基本性质方面深入探索了提高硅基光电探测器性能的可能途径,以制备出适合通信的工作于 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 波段的硅基光电探测器。

1.1 SiGe 材料的研究进展

虽然以硅材料为基础制作的PIN、MSM光电探测器,以其较高的性价比得到广泛的应用,但是由于Si和Ge及其合金都是间接带隙材料,在近红外波段,吸收系数较直接带隙材料的要小(小于 $1\times 10^2\ \text{cm}^{-1}$),制作成的探测器的响应速率和量子效率都非常低,因此在光通信领域的应用有很大的局限性。然而随着材料科学的发展和生长设备的提高,通过物性改造如能带工程、纳米工程、Si的化合物等方法,改变了硅基材料在光电子领域的被动局面,因此探索可与硅基微电子电路实现单片集成的硅基光电子器件再次成为近年来的研究热点。

1.1.1 SiGe/Si 多量子阱材料

由于 Si 和 Ge 的晶格常数不匹配,失配度达 4.2%,难以实现异质的匹配生长。利用 MBE、MOCVD、UHV-CVD 超薄外延技术生长的 SiGe/Si 多量子阱材料,只要厚度小于临界厚度,就可以实现没有失配位错的应变量子阱材料。由于 SiGe 应变的存在,使得 SiGe 的禁带宽度变小,当 Ge 组分达到 0.6 以上时, SiGe

的禁带宽度甚至比 Ge 的禁带宽度还要小^[5], 这就为 SiGe 应变材料对石英光纤窗口波长 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 的光吸收提供了可能。但事实上, 由于 SiGe 材料为间接带隙材料, 对光的吸收系数比 III-V 族材料低 3-5 个量级, 为了增加探测器的量子效率, 最初制作的 SiGe/Si 多量子阱探测器均为波导型结构。1986 年 AT&T Bell 实验室首先提出了 SiGe/Si 多量子阱波导型 PIN 光电探测器的结构^[6], 他们首次研制出工作在 $1.3\ \mu\text{m}$ 的 SiGe/Si 多量子阱探测器, 量子效率达到 10%, 漏电流为 $0.4\ \mu\text{A}$ 。

国内比较有代表性的就是中科院半导体所研究小组^[7]采用 RCE 结构, 研制出 $1.3\ \mu\text{m}$ 的 SiGe/Si 多量子阱光电探测器, 如图 1.1 所示, 实验中是以用 SOI 为衬底, 其上外延生长了 SiGe/Si 多量子阱吸收区, 利用 SOI 和最上层淀积 SiO_2/Si 为上下反射镜所构成的谐振腔, 利用共振增强效应, 使得器件在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处量子效率达到 3.5%, 比当时国际上报道的 Ge 组分为 0.5 的正入射 PIN 探测器的效率提高了 3-4 倍, 而暗电流减小了一个量级, 这一成果被 laser focus world 收录并做新闻报道。在此基础上, 又采用了背入射结构解决了正入射中下反射镜的放射率难于提高的难题, 取得很好的成果。

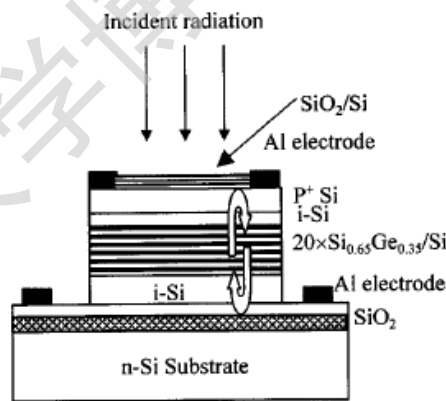


图 1.1 SiGe/Si 多量子阱材料的 RCE-PIN 探测器的器件结构

然而, 应变 SiGe 是间接带隙材料, 吸收系数不大, 要实现对 $1.3\ \mu\text{m}$ 以上波长的光有效吸收, Ge 组分应在 0.5 以上, 此时临界厚度将成为限制量子效率的主要因素。

1.1.2 Ge 纳米岛材料和高组分表面起伏的多量子阱

对于 GeSi/Si 多量子阱，是通过 Ge 组分的加入，实现在 1.3 μm 波长有明显的响应^[8-9]。但要实现 1.55 μm 的响应，必须提高 SiGe 中 Ge 的组分，并且增加 SiGe 层的厚度以尽量减少量子限制效应，由于 Ge 和 Si 之间存在着严重的晶格失配，且 Ge 的表面能比 Si 小，在 Si 上外延高组分的 SiGe 合金或 Ge，一种方法：生长高组分的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 遵循典型的 SK 模式：超过临界厚度后，将发生三维生长，出现 Ge 纳米岛以释放应力，中科院半导体所李传波等小组^[10]利用 Ge 纳米岛制作成的垂直腔 RCE 探测器，吸收区为 10 层 8ML-Ge/33nm-Si，器件在 1.54 μm 处，响应度为 0.028 mA/W。另一种方法：对于生长高组分的 SiGe 层，厚度超过临界厚度时，应力以表面起伏形式释放，图 1.2 给出了 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 合金多量子阱，周期为 10 的 TEM 图象，从中可以看出量子阱材料发生了明显的起伏，没有位错产生，用低温 PL 谱表征，如图 1.3，表面起伏的 SiGe/Si 多量子阱材料响应波长可以延伸到 1.6 μm ，可以实现 1.55 μm 的光响应^[11]，Dan-Xia Xu 小组利用 UHV-CVD 方法在 525 $^{\circ}\text{C}$ 生长了表面起伏的 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 多量子阱材料，做成 MSM 结构的光电探测器，器件在 1.52 μm 的光响应度为 0.12 A/W^[12]。

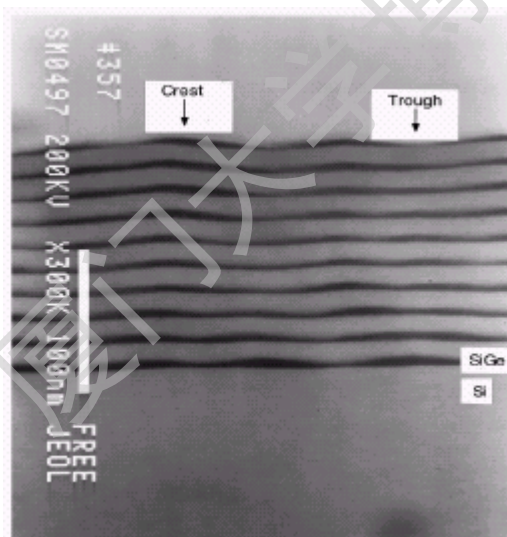


图 1.2 表面起伏的 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 多量子阱 TEM 照

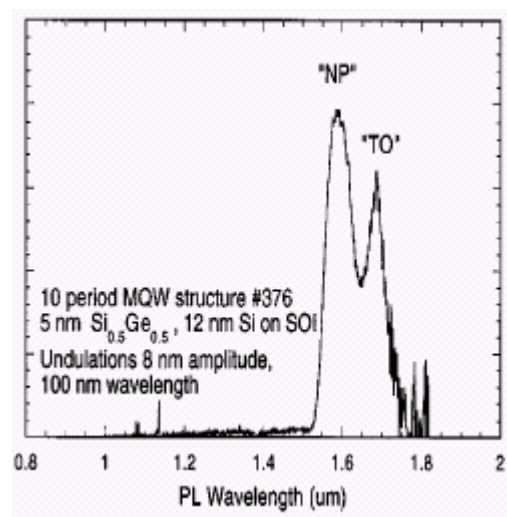


图 1.3 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 多量子阱低温 PL 谱

1.1.3 外延 Ge 材料

与Si同为四族材料的Ge对近红外光有较大的吸收,然而Si和Ge材料之间存在4.2%的晶格失配,直接在Si材料上外延厚层Ge单晶格将由于失配应力的作用而引入高的位错密度,较早的研究主要集中的生长Ge之前生长GeSi/Si超晶格缓冲层,然而这种方法消耗较大的资源,价格比较昂贵。

意大利小组 Colace 小组^[13]报道的外延体 Ge 材料的方法相对简单,其外延是在热壁超高真空 CVD 系统中完成,可通过低温(330℃)生长一层完全弛豫 Ge 薄层(50 nm)来释放位错,然后再升温(600℃),以较快的速度生长体 Ge,得到高质量的材料。用此材料做的 PIN 探测器,在 600℃退火 5 min 形成的 Ge 探测器,器件在 1.3 μm 和 1.55 μm 处响应度分别为 0.89 A/W 和 0.75 A/W,在-1 V 的偏压下,暗电流为 1.2 μA,该器件已经能够应用与 2.5Gb/s 的集成光接受机芯片。另外 G Luo 等^[14]报道了一种采用薄层外延层来释放应力,具体是用两种不同组分的薄 SiGe 层做为缓冲层,通过调整 Ge 组分和 SiGe 层的厚度将位错俘获在介质界面处,大大减少了 Ge 层的位错密度。Z Huang 等人^[15]利用此方法在冷壁的 UHV-CVD 系统中,先生长 0.4 μm Si_{0.45}Ge_{0.55}后长 0.6 μm Si_{0.35}Ge_{0.65},接着在 750℃退火 15 min,后在 400℃生长 2.5 μm Ge 层,此器件在-10 V 偏压下的暗电流为 1.07 μA,在 1.3 μm 处 0V 偏压和 2 V 负偏压下响应度分别为 0.37 A/W,0.57 A/W,3 dB 带宽达到 8.1 GHz。

虽然 Ge 材料在近红外的吸收远大于 SiGe 材料,禁带宽度可达到 0.66 eV,响应波长可以延伸到 1.6 μm,而且 Ge 比 Si 的迁移率大,相应器件的响应速度大。但是由于 Si 和 Ge 之间存在着严重的晶格失配,在生长 Ge 的过程中容易引入较高的位错密度,且 Ge 探测器没有好的氧化保护层,器件的漏电流较大,影响制备高性能探测器的要求。

1.2 SiGe/Si 多量子阱材料的性质

对于 Si 基 SiGe 光电探测器,选择不同的 Ge 组分可以使探测器工作在三个主要的应用波段 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 附近。 $0.8 \mu\text{m}$ 波段可以用在芯片中的光互联,一方面可以利用低价的 GaAs 激光器做光源,另一方面可以直接用

Si 作探测器。用于短距离城域网光纤通信 1.3 μm 波段的光电探测器可以通过应变 SiGe 量子阱来实现。1.55 μm 光探测器可以用在长距离光纤通信中，通常要生长高 Ge 组分的 Ge 纳米岛或体 Ge 材料来实现。

本论文主要研究 1.3 μm 波段的光电探测器，通过生长应变 SiGe/Si 多量子阱来实现，本节将介绍 SiGe 应变层和 SiGe/Si 多量子阱的临界厚度和能带结构。

由于 Si 和 Ge 材料的晶格常数分别为 0.357 nm 和 0.357 nm，晶格失配率高达 4.2%，属于大失配体系。在 Si 衬底上外延生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层必然要遵循一定的原则：在 Si 衬底上共度生长的应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层是不稳定的，应变能会随着层厚增加而线性增加，当层厚超过某一临界厚度 h_c 时，积聚的能量就以失配位错的形式释放出来，界面两侧的两种异质原子的排列就会重新错开，从而使应变减小，这种现象称为应变弛豫，所以单个应变层的共度生长有一个临界厚度值 h_c ，它满足以下超越方程^[16]：

$$h_c = \frac{1}{\varepsilon} \frac{b(1-\nu \cos^2 \theta)}{8\pi(1+\nu) \cos \lambda} \ln\left(\frac{4h_c}{b}\right) \quad (1.1)$$

对于 SiGe 应变层，参数 $\nu=0.28$ (为泊松比)， $\cos \lambda = \cos \theta = 0.5$ ， b 为 Burgers 矢量，约为 0.4 nm，1.1 式可以简化为：

$$h_c = \frac{0.023}{\varepsilon} \ln\left(\frac{4h_c}{b}\right) \quad (1.2)$$

研究表明，共度生长在 Si(100)衬底上的包含 N 个周期的 SiGe/Si 多层应变层结构，设 SiGe 层的厚度为 h ，Si 层厚度为 H ，则总的厚的 $T=N(h+H)$ ，在每层 SiGe 厚度小于单层临界厚度的前提下，对应于 N 个周期的 SiGe 层的总临界厚度满足：

$$Nh = \frac{0.023}{\varepsilon} \ln\left(\frac{4N(h+H)}{b}\right) = \frac{0.55}{x} \ln 10N(h+H) \quad (1.3)$$

所以在生长材料的过程中，应尽量增加有源层的厚度，以增加吸收系数。以上式子即 Matthews-Blakeslee 模型，它反映了位错弛豫的热平衡过程。

同时，应力的存在也使得 SiGe 应变层的能带结构发生了变化，我们知道在 Si 衬底上生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层在水平方向受到压应变，垂直方向受到张应变，从而使 SiGe 应变合金层的带隙要比体材料的小的多，如图 1.4 所示，虚线表示了应变的 SiGe 材料的禁带宽度，在 Ge 组分达到 0.6 以上时，SiGe 的禁带宽度比

Ge 的禁带宽度还要小。在应变 SiGe/Si 量子阱中, 应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层禁带宽度一方面受到 Ge 组分的限制, Ge 组分越大, 禁带宽度越小; 另一方面, 大的 Ge 组分下临界厚度越小, 量子尺寸限制效应越强, 导致了能级分裂, 基态向上移动, 此时量子效应引起的能级上移比 Ge 增加引起的能级下移要大, 因此禁带宽度反而有变大的趋势。图中点线为不同 Ge 组分下, SiGe/Si 量子阱中 SiGe 层厚度为临界厚度时的禁带宽度, 考虑了 SiGe/Si 量子阱平衡态和亚稳态的情况和量子限制效应引起的禁带宽化, 从图中可以看出, SiGe/Si 量子阱材料的禁带宽度已减小到 0.95eV 以下, 响应波长可以宽展到 1.3 μm 以上, 对应于 1.3 μm 的禁带宽度要求 Ge 组分要在 0.3 以上, SiGe 应变层为压稳态应变层, 由此可见有效的控制 Ge 组分, SiGe/Si 量子阱结构可以制作成 1.3~1.55 μm 波长光响应的探测器, 适用于光通信。

但是, SiGe 合金具有间接带隙材料的性质, 在 1.3~1.55 μm 波段吸收系数非常小, 因此在制作探测器过程中, 一方面要加大 Ge 组分以增加吸收系数, 另一方面也要选择适当的器件结构以增加探测器效率的目的。

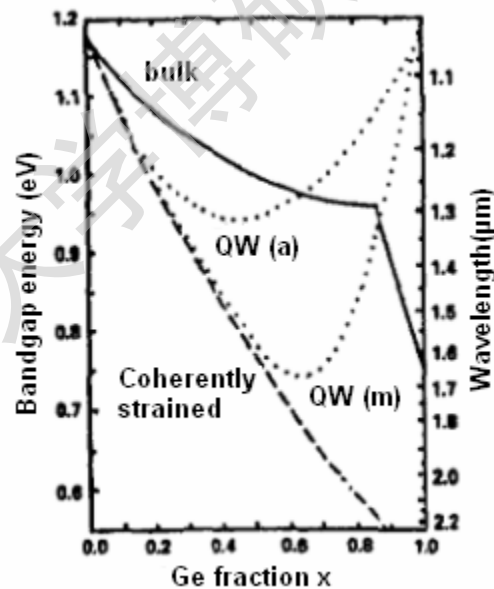


图 1.4 SiGe/Si 量子阱的禁带宽度和 Ge 组分的关系

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库